



Klimaændringer og processer og funktion i terrestriske økosystemer

Schmidt, I.K.; Beier, Claus; Kongstad, J.; Andresen, L.; Michelsen, A.; Albert, Kristian Rost; Ambus, Per; Selsted, M.; Maraldo, K.; Holmstrup, M.

Total number of authors:
15

Published in:
Flora og Fauna

Publication date:
2007

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Schmidt, I. K., Beier, C., Kongstad, J., Andresen, L., Michelsen, A., Albert, K. R., Ambus, P., Selsted, M., Maraldo, K., Holmstrup, M., Arndal, M., Mikkelsen, T. N., Ro-Poulsen, H., Jonassen, S., & Karsten, R. J. (2007). Klimaændringer og processer og funktion i terrestriske økosystemer. *Flora og Fauna*, 113, 117-128.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

FLORA OG FAUNA

Udgivet af
Naturhistorisk
Forening for Jylland

Konference:

Klimaaændringer og den danske natur - set i et internationalt perspektiv

Dette er et specialfremstillet særtryk af en af artiklerne fra den konference „Klimaaændringer og den danske natur - set i et internationalt perspektiv“, som Naturhistorisk Forening for Jylland afholdt 24. nov. 2007 på Naturhistorisk Museum i Århus.

Omslaget og sidetal og henvisninger kan blive ændret i den endelige udgave.

Foreningens tidsskrift „Flora og Fauna“ bringer samtlige artikler fra konferencen i et særnummer, der udkommer medio februar - og kan købes enkeltvis, men hæftet kan også fås ved abonnement på hele 2007-årgangen for i alt kr. 155.

Læs mere om foreningen på: www.floraogfauna.dk

Klimaændringer og processer og funktion i terrestriske økosystemer

Inger Kappel Schmidt¹, Claus Beier², Jane Kongstad¹, Louise Andresen³, Anders Michelsen³, Kristian Albert^{2,3}, Per Ambus², Merete Selsted², Kristine Maraldo⁴, Martin Holmstrup⁴, Marie Arndal¹, Teis N. Mikkelsen², Helge Ro-Poulsen³, Sven Jonassen³, Rune Juelsborg Karsten³

Klimaændringerne vil ændre basale faktorer i terrestriske økosystemer som vandforhold og temperatur. Disse faktorer har direkte og indirekte indflydelse på alle processer i økosystemet. Klimaændringer vil derfor påvirke levevilkårene for planter og dyr gennem en kaskade af effekter, som vil ændre økosystemernes artssammensætning, struktur og funktion. Klimaændrings påvirkning af økosystemets processer, og planter og dyrs respons på de ændrede vilkår, er undersøgt i større klimaforsøg og studier langs klimatiske gradienter gennem de seneste år. Resultater fra danske klimaforsøg på heder viser, at de komplekse sammenhænge mellem økosystemets processer og spillet med de klimatiske vilkår medfører, at klimaets effekter på økosystemerne er svære at forudsige.

Økosystemer er komplekse systemer af planter, dyr og mikroorganismer, der fungerer i samspil med de fysiske faktorer som klima og jorden. Økosystemets processer er snævert koblet til de klimatiske vilkår, og der foregår derfor en konstant udvikling af økosystemerne i samspil med klimaet.

Planterne optager således (Figur 1) CO₂ fra atmosfæren og videregiver ca. halvdelen af det assimilerede kulstof til jorden i form af førne og rod-exudater. Resten kommer tilbage til atmosfæren i form af CO₂ ved planternes respiration. I jorden sker der til stadighed en nedbrydning af organisk stof, så hovedparten af det planteassimilerede kulstof respireres tilbage til atmosfæren. I gennemsnit vil assimileret kulstof have

en opholdstid i økosystemet på måske 5-40 år, hvilket dækker over en opholdstid af forskellige kulstof-fractioner på fra få timer til årtusinder. Økosystemet vil samlet set være et nettodræn for atmosfærens kulstof, hvis mere CO₂ assimileres af planterne, end der respireres fra økosystemernes organismer. Omvendt vil økosystemet virke som en nettokilde til atmosfærens kulstof, hvis respirationen overstiger det assimilerede. Dermed bidrager økosystemet selv positivt eller negativt til drivhuseffekten.

Klimaændringer medfører samtidige ændringer af den atmosfæriske CO₂-koncentration, temperatur og nedbør. Klimamodeller for Danmark (fx Christensen 2008) peger på, at minimumstemperaturen bliver for-

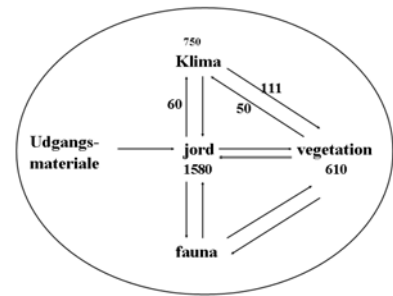


Fig. 1. Samspil mellem klima og økosystem. Tal angiver kulstofpuljer og kulstofflux (pile) i det globale kulstofkredsløb i Gt (giga-ton = milliarder ton).

højet, og at den samlede nedbør måske stiger med 10%. Samtidig ændres nedbørsmønstret, så der falder mindre sommernedbør, mens vinternedbøren øges. De sæsonmæssige forskydninger vil desuden blive fulgt af flere ekstreme klimahændelser, hvilket bl.a. vil indebære at nedbøren kommer som færre, men kraftigere regnskyl efterfulgt af længere tørkeperioder.

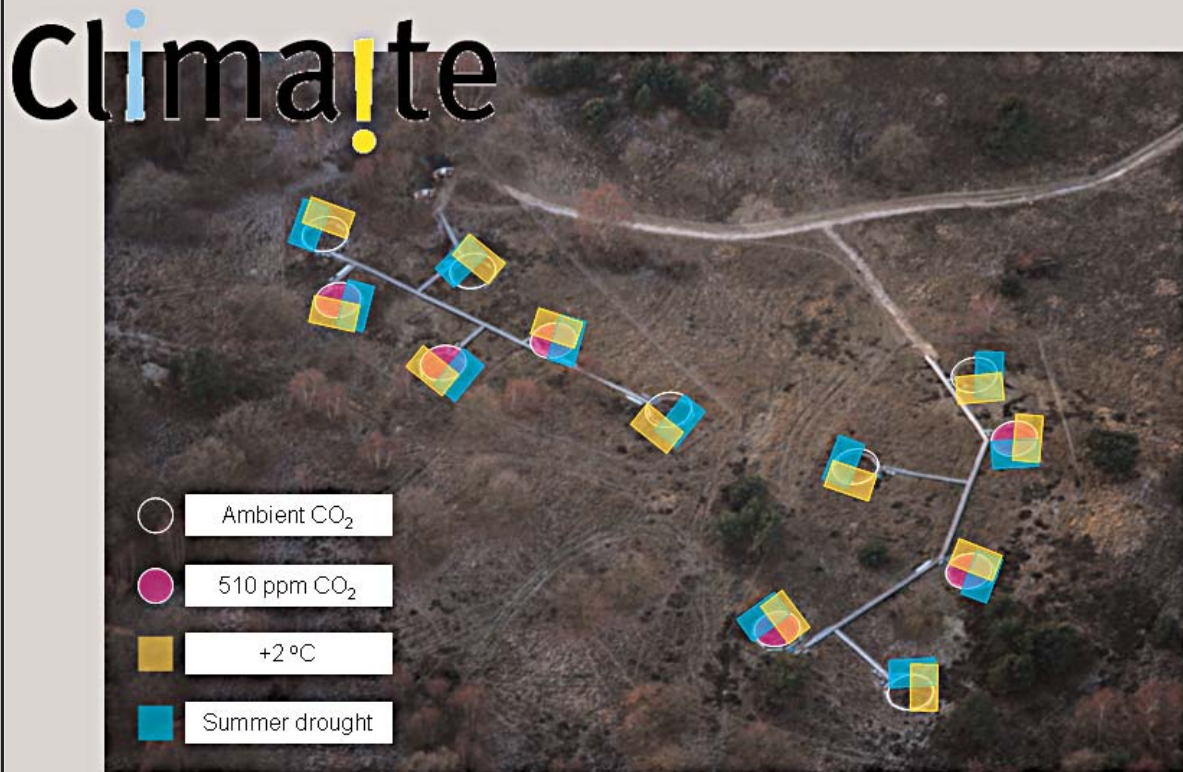
Klimaforsøg i praksis

I de seneste 20 år har der været øget forskningsmæssig fokus på, hvordan klimaændringer vil påvirke vores natur – specielt i det arktiske område, da klimamodeller peger på, at temperaturstigningerne er størst her, og ydermere at sensitiviteten overfor temperatur også er størst i de kolde egne.

I studier af klimaets påvirkning af økosystemer anvendes forskellige metoder. En udbredt metode er *monitoring*, hvor man år efter år måler de samme parametre, f.eks. nøgleprocesser i planter som løvspring, blomstring, løvfald etc. Her bruger man variationen i klimaet fra år til år til at beskrive sammenhænge mellem klima og økosystempro-

¹)Skov & Landskab, Københavns Universitet, ²)Risø, Danmarks Tekniske Universitet, ³)Biologisk Institut, Københavns Universitet, ⁴)DMU, Århus Universitet

CLIMAITE er et relativt nyt dansk klimacenter støttet af Villum Kann Rasmussen Fonden. Det er bygget op om et fælles klimaforsøg ved Jægerspris, hvor et økosystem manipuleres med de tre væsentligste klimafaktorer: CO₂, temperatur og nedbør (Figur 5). Manipulationerne forsøger at skabe de klimaforandringer, som forudses i Danmark anno 2075 med en 35 % forøgelse af den atmosfæriske CO₂-koncentration til 510 ppm, 2 °C højere minimumstemperatur og forlænget sommertørke. Behandlingerne startede i 2005. Effekten af behandlingerne sammenlignes med ubehandlede kontrolfelter.



Luftfoto af CLIMAITE-forsøget med klimamanipulationer. Forsøget består af 12 oktagoner (diam. 6.5 m), hvor 6 ringe har forhøjet CO₂ og 6 ringe ikke har ekstra CO₂ (A for ambient). Hver oktagon er delt i 4 felter, der udsættes for hhv. tørke, varme, tørke+varme eller er kontrolfelt. Foto: Kastrup Luftfoto.

Forhøjet minimumstemperatur skabes ved at reflektive gardiner glider ud over vegetationen om natten og dermed tilbageholder en del af den varme, som solen har tilført økosystemet om dagen. Gardinerne ruller fra igen om morgenen, og felterne er derfor uden manipulation om dagen. Gardinerne er styret af lysmåler eller timer. I tilfælde af regn om natten glider gardinerne fra, så den hydrologiske balance opretholdes.

Sommertørke skabes på tilsvarende vis med plastikgardiner, som overdækker felterne i tilfælde af regn. De er styret af en regnsensor, der aktiveres i en periode på 1-2 måneder i forsommeren, når det regner. De specielt designede rullegardiner fjernes automatisk, når de ikke er i brug for at mindske uønskede side-effekter så som skygge, vind og ændret vandbalance.

Forhøjet CO₂ doseres kontinuerligt ved at koncentreret CO₂ blæses ud af 0.3 mm dyser fra en ring om felterne. Det er kun dyser i vindsiden, der er åbne, så CO₂ blæser med vinden ind over felterne.



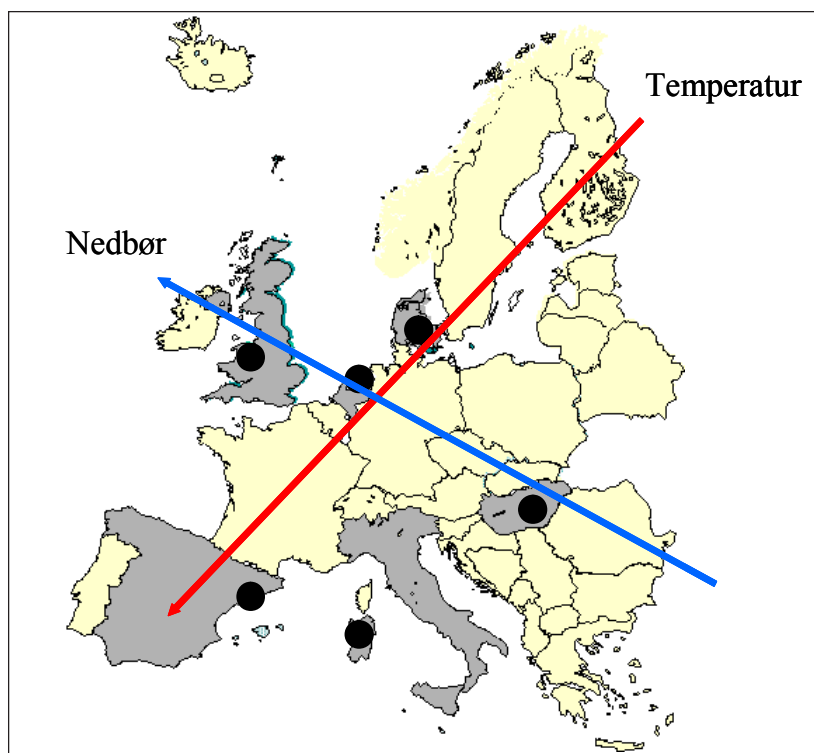
Figur 2. CLIMAITE-forsøget ligger på Brandbjerg ved Jægerspris. Her udsættes en hede for et klimascenarie, som det forventes i Danmark anno 2075 med samtidige forhøjelser af CO₂-koncentration, temperatur og forlænget sommertørke. Manipulationerne startede i 2004.

cesser. En anden metode er at lave *gradient-studier*, hvor man måler en række parametre under forskellige naturlige temperatur- eller fugtighedsforhold (gradienter) og derefter kortlægger sammenhængen mellem forskellige processer eller arter og de klimatiske betingelser. Denne metode kaldes også for "space for time substitution", fordi man populært sagt erstatter måling af en tidsmæssig udvikling med måling på forskellige steder, der repræsenterer de vilkår, der forudsiges at gælde i en fremtidig udvikling.

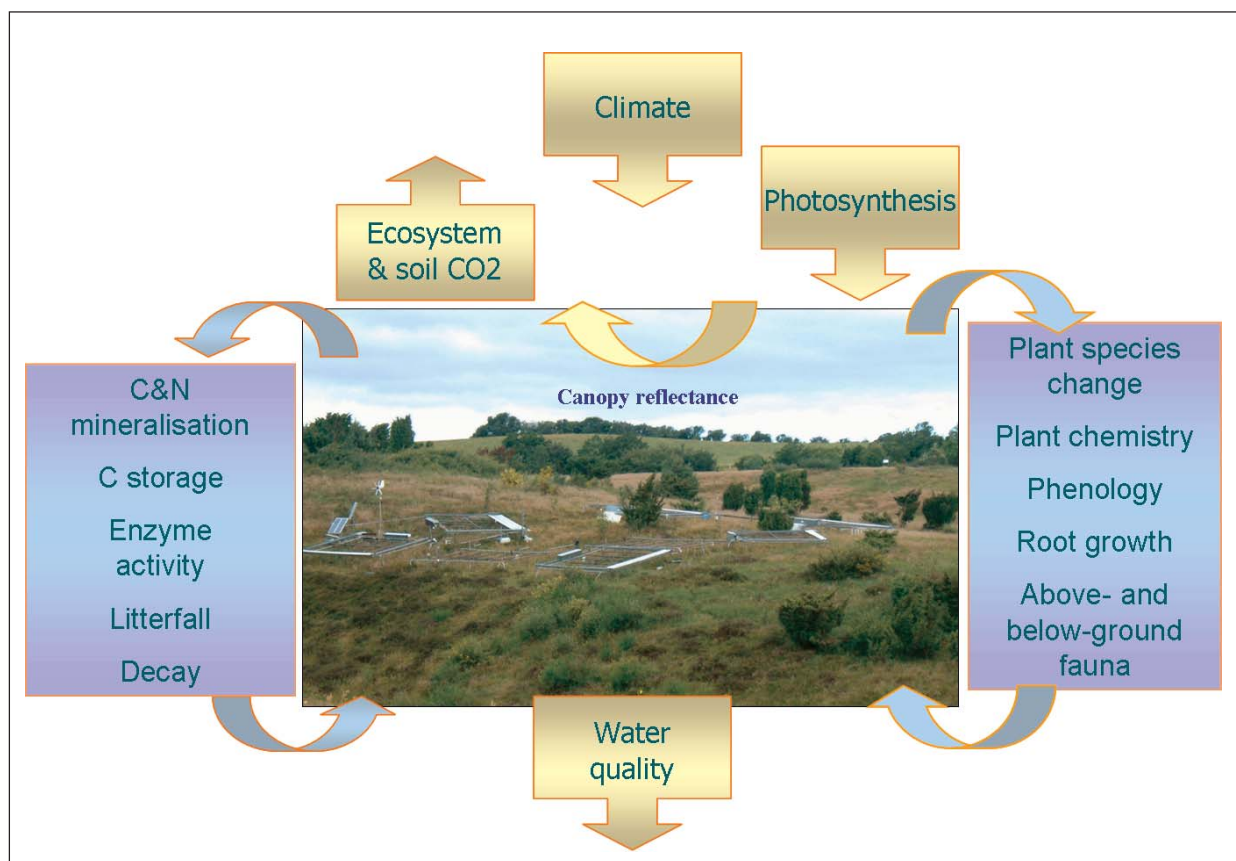
En sidste måde at undersøge klima-effekter på er gennem *eksperiment-er*, hvor man udsætter et økosystem for klimaforandringer eller undersøger processer eller arters respons til klima i laboratoriet. Her er det vigtigt, at klimamanipulationerne er realistiske, og at der ikke sker uønskede forstyrrelser. Danmark er godt repræsenteret med klimaforsøg. I Danmark har Risø og Skov&Landskab, KU i samarbejde udviklet et design for klimamanipulationer, som kun har minimale uønskede effekter, og som ændrer kli-



Figur 3. Den danske del af VULCAN-forsøgene ligger i Mols Bjerge. Manipulationerne består af nat-opvarmning og forlænget sommertørke. *Natopvarmning*: Når solen går ned, trækkes gardiner hen over vegetationen og dermed tilbageholdes noget af dagens sol-tilførte opvarmning. *Sommertørke*: I 1-2 sommer måneder ruller gardiner ud over tørkefelterne i tilfælde af regn. Manipulationerne blev startet i foråret 1999.



Figur 4. Danmark er med i et europæisk netværk af klimaforsøg VULCAN, der undersøger klima-effekter på terrestriske økosystemer. De samme målinger foretages på alle lokaliteter, og vi kan opstille responsfunktioner ift. den naturlige temperatur og fugtighedsgradient. En del målinger gentages (næsten) hvert år, og år til år variationen bruges til at kortlægge responsfunktioner ift. temperatur og fugtighed.



Figur 5. Skematisk oversigt over nogle af de væsentligste parametre, der bliver målt i klimaforsøgene og samspillet mellem klima, økosystemets struktur, processer og funktion.

maet på samme vis, som det er forudset i klimamodeller for Danmark (se boks). Det ene forsøg ligger i Mols Bjerge, og er en del af et europæisk netværk af klimaforsøg, VULCAN (Vulnerability assessment of shrubland ecosystems in Europe under climatic changes; www.vulcanproject.com), som skal belyse, hvordan stigende temperatur og forlænget sommertørke vil påvirke sårbare økosystemer som hede (Figur 3). Det andet forsøg ligger ved Jægerspris (Figur 2) og hører ind under klimacentret CLIMAITE, som er et forskningssamarbejde mellem Risø DTU, Danmarks Tekniske Universitet, Skov & Landskab og Biologisk Institut på Københavns Universitet og Danmarks Miljøundersøgelser,

Århus Universitet (Beier et al. 2004; Mikkelsen et al. 2007). VULCAN-forsøgene er i øvrigt en kombination af et gradient-studie og et eksperimentelt forsøg, idet de seks lokaliteter er placeret langs en europæisk temperatur- og fugtighedsgradient (Figur 4).

Klimaændringer og økosystemprocesser

Klimaforandringer betyder ændringer i de basale faktorer, der styrer økosystemets processer. Derfor vil klimaændringer betyde ændringer i økosystemernes struktur og funktion. Klimaforandringer er samtidige forandringer af mange faktorer, som hver for sig påvirker processerne direkte eller indirekte. Det vil udløse en kaskade af effekter. I VUL-

CAN og CLIMAITE-forsøgene, som begge er etableret på østdanske heder, undersøger vi både de væsentligste processer i økosystemet og deres funktion for hele økosystemet og dets feed-back til klimaet (Figur 5). Vi har lært en del om de enkelte faktoreres effekt på processer og økosystem, men først med CLIMAITE forsøget, har vi siden efteråret 2005 haft mulighed for at studere interaktioner mellem forhøjet temperatur, CO₂ og nedbørsændringer.

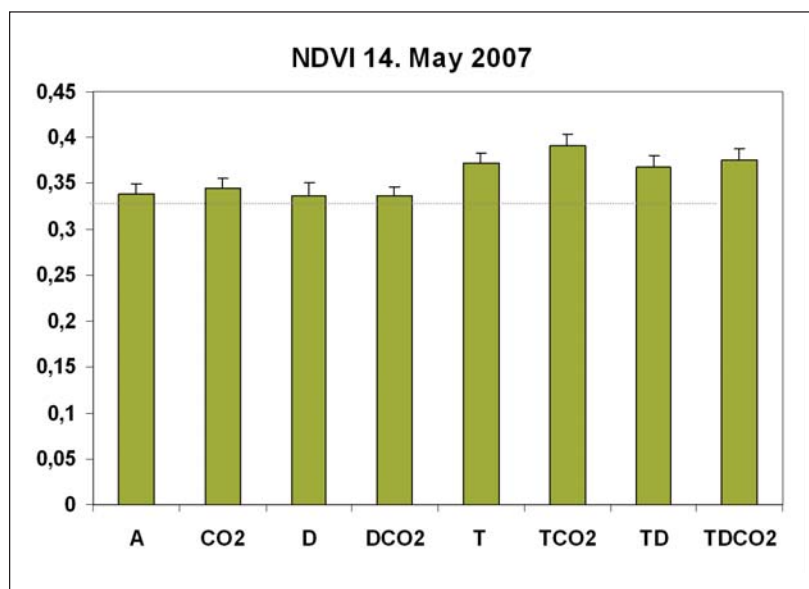
Højere temperaturer ændrer vækstsæsonen

De forhøjede temperaturer, som vi har oplevet i de senere år, har betydet længere vækstsæson. I Danmark ser vi allerede nu et tidligere

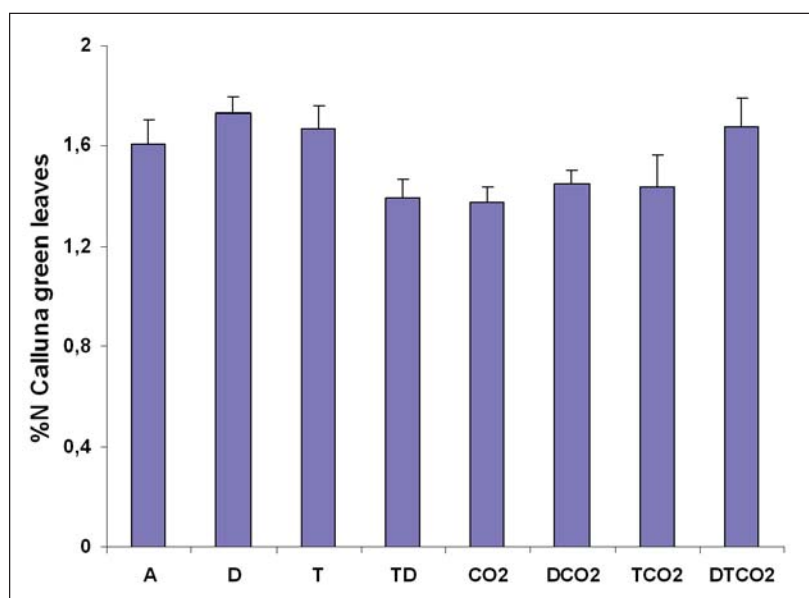
løvspring eller tidligere længdevækst af skud pga. forhøjede temperaturer. Det betyder relativt meget for planterne, at de kan starte vækssæsonen tidligere, da der om foråret oftest er mere vand, næring og lys til rådighed. I klimaforsøgene betyder overdækning med gardiner om natten, at varmeudstråling begrænses. Det øger temperaturen i jord og luft med 1-2 °C. Det betyder en tidligere start på vækstsæsonen, men ikke for alle arter. I VULCAN-projektet sammenlignede vi tidspunkterne for, hvornår planternes årsskud nåede 50 % af den endelige længde. Bølget Bunke (*Deschampsia flexuosa*) nåede det 19 dage tidligere i opvarmede felter end i kontrolfelterne. Derimod fandt vi ikke forskelle hos Hedelyng (*Calluna vulgaris*) i Danmark, og i Wales var der tendens til at skuddene af Hedelyng og Revling (*Empetrum nigrum*) nåede 50% af slutlængden senere i de opvarmede felter (www.vulcanproject.com/publications/newsletter). I CLIMAITE-forsøget fandt vi en 15% større grøn biomasse udtrykt ved NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) i maj i alle felter, der modtog natopvarmning (Figur 6). Helt frem til august var NDVI højere i felter, der modtog natopvarmning.

Det var specielt tidligt på året, vi observerede en effekt af opvarmning på vegetationen. Om efteråret og vinteren vil det dog være lysmængden, der begrænser planternes vækst. I denne periode forventer vi, at nedbrydningsprocesserne i jorden er højere i de opvarmede felter. Det kan give forøgede næringsstofkoncentrationer i jorden og potentiel højere udvaskning af næringsstoffer (se senere).

Resultaterne viser, at temperaturpåvirkningen er forskellig i forskellige plantearter, hvilket kan betyde ændringer i konkurrenceforholdene og på længere sigt ændringer i plantesamfundet. Ændringer i vækstsæ-



Figur 6. NDVI i maj måned 2007 i CLIMAITE-forsøget. NDVI er en indikator for grøn biomasse og beregnes ud fra, hvor stor en andel af hhv. synligt og infrarødt lys, der reflekteres af vegetationen. Friske grønne blade absorberer det meste af det synlige lys, men reflekterer en stor del af det infrarøde lys. Det forholder sig lige omvendt med visne blade. A=ambient, CO₂=forhøjet CO₂, T=natopvarmning, D=tørke.



Figur 7. Kvælstofprocenten i grønne blade af *Calluna vulgaris* udsat for klimamanipulationer gennem to år. Data fra Climaite forsøget. A=ambient, CO₂=forhøjet CO₂, T=natopvarmning, D=tørke.

sonen kan desuden betyde, at insekter og deres fødeplanter eller fugle og de larver, de lever af, ikke længere er synkroniseret.

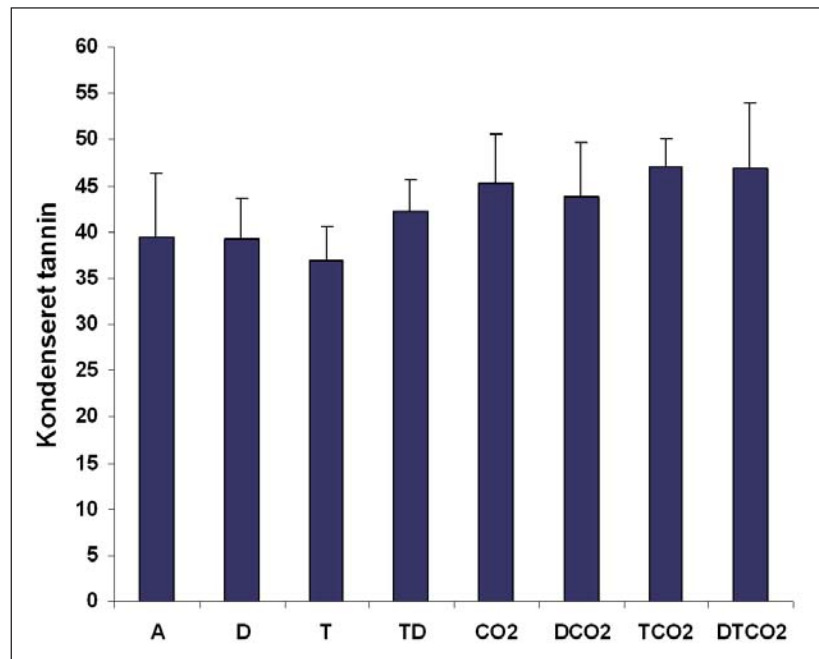
CO₂ er gødning for planterne

Forhøjet CO₂ påvirker planterne direkte. Det er byggeklodser i fotosyntesen, og ekstra CO₂ resulterer som regel i en forøget plantevækst. Denne effekt er dog afhængig af økosystemets næringstilstand. I CLIMAITE-forsøget har vi målt op til 50% forøgelse af fotosynteseraten i Bølget Bunke. Det følges ikke af en tilsvarende stigning i plantevækst i felter med forhøjet CO₂. Det skyldes sandsynligvis, at den øgede fotosyntese ikke følges af en tilsvarende forøget frigivelse af næringsstoffer. Resultatet er, at næringsstoffer som kvælstof (N) bliver fortyndet i bladvævet, idet der indbygges relativt mere kulstof. Målinger af N-niveauet i blade og stængler fra hedelyng i CLIMAITE-forsøget viser nedgang i N-procenten ved forhøjet CO₂ (Fig. 7). Når der er overskud af kulstof i bladene, danner planterne ofte sekundære metabolitter. Målinger af det samlede indhold af tanniner (kondenseret tannin er polyfenoler) i hedelyngens blade viser, at øget kulstof fra fotosyntesen i CO₂-behandlede felter bl.a. er gået til at danne flere sekundære metabolitter (Fig. 8).

Når bladmateriale indeholder lavere mængde kvælstof og mere tannin, er det sværere fordøjeligt for herbivorer og nedbrydere i jorden. Effekten af forhøjet CO₂ på bladkemia kan derfor betyde funktionelle ændringer i økosystemet.

Klima, førnekvalitet og omsætning af organisk stof

Klimaet kan altså direkte påvirke den kemiske sammensætning i bladet, som det ses efter eksperimentel forøget CO₂. Også varme og tørke kan påvirke bladvævet kemiske sammensætning. Når økosystemet



Figur 8. Kondenseret tannin i hedelyngens blade efter to års klimamanipulationer. Data er fra CLIMAITE-forsøget. A=ambient, CO₂=forhøjet CO₂, T=natopvarmning, D=tørke.

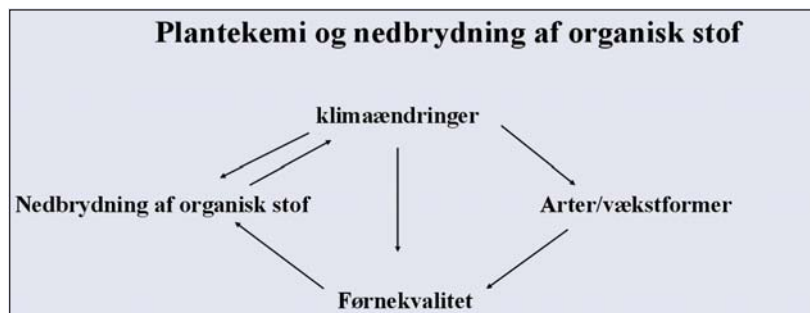
varmes op vil både fotosyntesen og den mikrobielle omsætning af organisk stof påvirkes positivt. Alt efter om fotosyntesen og dermed plantevæksten stiger mere end frigivelsen af næringsstoffer i jorden vil bladkemia ændres som følge af opvarmningen. Klimaændringer kan desuden påvirke plantesamfundets sammensætning og dermed førnens sammensætning (Fig. 9). Disse ændringer vil påvirke både mængden og kvaliteten af førne, som igen vil påvirke nedbrydningen af organisk stof og dermed mængden af tilgængeligt næring i jorden. I et stort forsøg fra Abisko i Nordsverige blev nedbrydningen af førne fra en lang række klimaforsøg fra det arktiske og alpine område undersøgt. Førnens nedbrydning blev fulgt på to lokaliteter med temperaturer, der svarede til subarktiske og højarktiske forhold. Resultaterne viste, at klimaet de to steder forklarede mest af variationen i nedbrydning. Det

havde også stor betydning, hvilken vækstform planterne havde. Nedbrydningshastigheden var størst hos urt>græs>halvgræs>løvfældende busk>stedsegrøn busk>mos. Derimod havde det mindre betydning, om førnen kom fra kontrolfelter eller felter, der havde været udsat for opvarmning (Cornellisen et al. 2007).

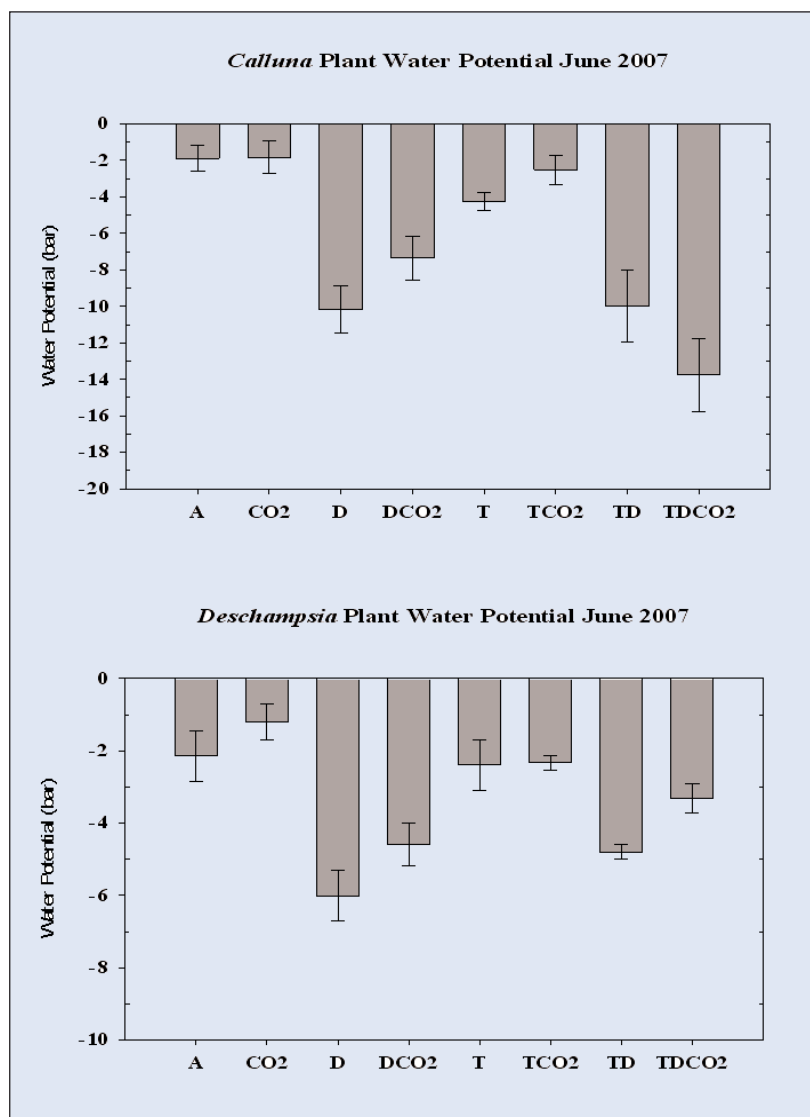
Tørke hæmmer de fleste processer

De fleste plante- og jordbundsprocesser blev hæmmet af tørke. Med undtagelse af VULCAN-lokaliteten i Wales, hvor der næsten er vandmættede tilstande i jorden, hæmmede tørke generelt de processer, vi har målt.

Den mest synlige effekt er tørkestress på planter. Efterhånden som en jord tørrer ud, skal der en større kraft til at hive vand ud af jorden. Den kraft, som en plante kan træk-



Figur 9. Klimaændringer kan påvirke det organiske stof på forskellig vis. Klimaændringer kan betyde ændret artssammensætning, som vil påvirke både kvantiteten og kvaliteten af førnen. Klimaet kan direkte påvirke den kemiske sammensætning af førnen og også nedbrydningen af førnen i jorden.

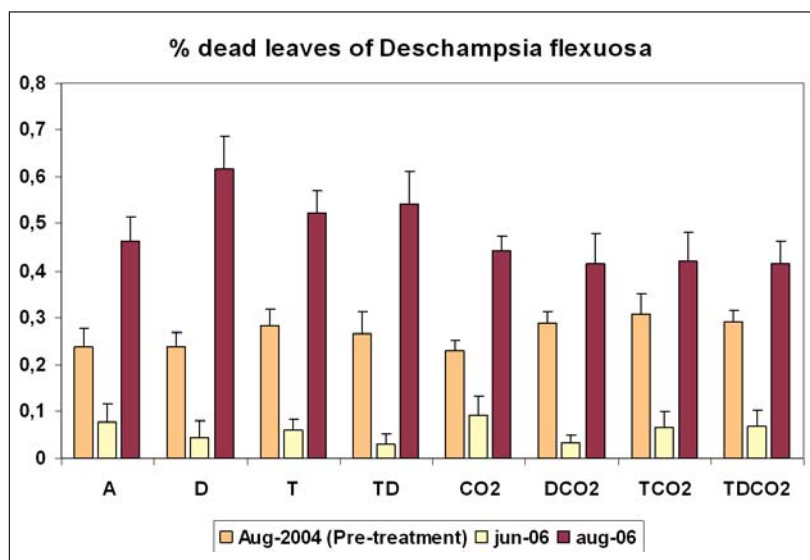


ke vandet ud af jorden med, kan måles som planternes vandpotentiale. Jo mindre vandtilgængelighed i jorden, jo større kraft skal planten suge med. Det betyder at jo mere negativt vandpotentialet er, jo større er undertrykket i plantens vandtransporterende væv, og jo større kraft suger planten med. Både Hedelyng og Bølget Bunke reagerede på tørke, og deres vandpotentiale var negativt påvirket ift. kontrol-situationen (Fig. 10).

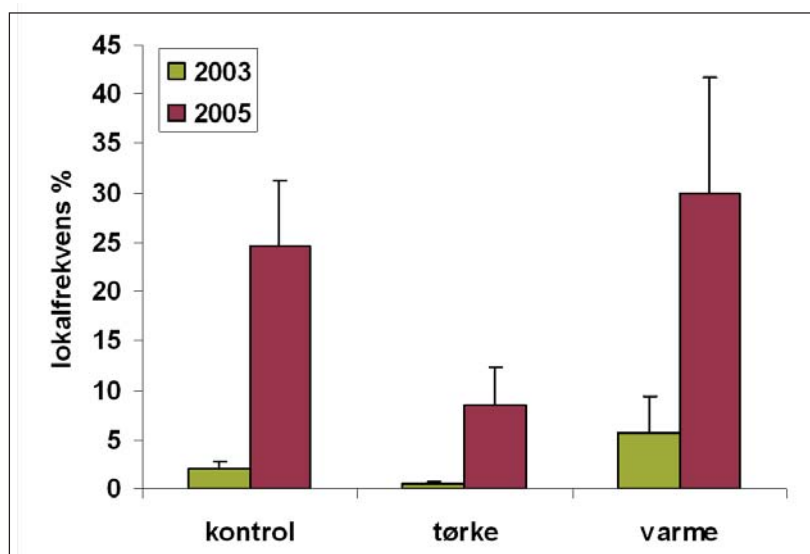
Hedelyng og Bølget Bunke er vidt forskelligt opbygget og klarer tørke på forskellig vis. Hedelyng kan hente vandet via dybtgående rødder, og da den samtidig er forveddet med stærke vandtransporterende cellestukturer (xylem), er den godt rustet til at klare tørke. Bladene har kraftige cellevægge, de er små og indrullede og har desuden bladhaar, der er med til at formindske fordampningen. Blandt andet derfor kan Hedelyng klare en del tørke og et ganske negativt vandpotentiale. I CLIMAITE-forsøget har vi målt Hedelyng vandpotentialer ned til 35 bar, hvilket nogenlunde svarer til en sugekraft på ca. 35 atm tryk. Med dette vandpotentiale suges de fleste vandmolekyler sandsynligvis ud af den sandede jord.

Bølget Bunke er en græs, som benytter en anden strategi. Den har også tørketilpasninger såsom blade, der kan sammenrulles, men dens rødder går ikke dybt. Den har blødere væv, der ikke tåler så højt et tryk. Når vandtilgængeligheden

Figur 10. Vandpotentialet i hede-lyng (øverst) og bølget bunke (nederst). Vandpotentialet i planter er den kraft, som planten skal bruge for at suge vandet ud af jorden. Jo mindre vandtilgængelighed i jorden, jo større kraft skal planten trække med. A=ambient, CO2=forhøjet CO2, T=natopvarmning, D=tørke.



Figur 11. Procentvis andel af døde blade af Bølget Bunke i CLIMAITE-forsøget. Målinger august 2004 var før klimamanipulationerne startede. Målinger i 2006 blev foretaget før (juni) og efter (august) tørkemanipulationen. Sommeren 2006 var meget varm og tør. A=ambient, CO₂=forhøjet CO₂, T=natopvarmning, D=tørke.



Figur 12. Regeneration af Hedelyng efter lyngbladbilleangreb. I 1999-2000 blev Hedelyng på VULCAN-forsøget på Mols spist af lyngbladbiller, og alle planterne døde. I 2001 blev der ikke fundet levende Hedelyng i felterne.

bli©ver lav, reagerer den fysiologisk som beskrevet ovenfor, men herefter er der for store omkostninger ved at holde bladene i live, og de visner. I en tør sommer som 2006 visnede knap 40% af bladene. I tør-

kefelterne visnede helt op til 55% (Figur 11). Til gengæld foregår dens fotosyntese-processer hurtigere. Så snart vandtilgængeligheden igen er passende, dannes en ny generation blade, og fotosyntesepro-

cesserne kan begynde.

Både figur 10 og 11 viser tydeligt, at der er en interaktion mellem tørke og forhøjet CO₂. Planterne er altså mindre tørkestressede, når de samtidig udsættes for CO₂-fumigering – det er målt som et mindre negativt vandpotentiale (Fig. 10) eller mindre bladdødelighed (Fig. 11), når CO₂ kombineres med tørke. Forhøjet CO₂ kompenserer altså positivt for det vandstress, som planterne oplevede, hvis de var udsat for tørke alene. Det giver mening, da planterne i en atmosfære med forhøjet CO₂ kan nedsætte åbning-graden af sine spalteåbninger og samtidig opretholde et uændret kulstofoptag. Dermed mindskes vandtab og vandforbrug sammenlignet med planter i kontrolfelterne.

Generelt viser vores målinger, at Hedelyng er ret robust overfor tørke. Det harmonerer ikke med plantens biogeografiske udbredelse, hvor den har en oceanisk udbredelse fra det nordlige Norge til det nordlige Spanien. I Danmark finder vi den også overvejende i Vestjylland. Forklaringen skal findes i dens regeneration. Hedelyng har en livslængde på 15 – 40 år, hvorefter den dør og skal etablere sig på ny fra frø, med mindre den udsættes for plejetiltag. VULCAN-forsøget på Mols var i 2000 udsat for lyngbladbilleangreb, hvor alle lyngplanterne døde. I kontrol- og især de opvarmede felter var regenerationen god, hvorimod kun få nye planter etablerede sig i tørkefelterne (Fig. 12).

Sommertørke er kritisk for regeneration af Hedelyng. Sammenholdt med målinger fra VULCAN-forsøget i Wales, hvor Revling klarer sig dårligere i opvarmede felter, er der grund til bekymring for heden som naturtype. I Wales såvel som i Danmark er Revling tæt på sin sydlige udbredelse. Hvis scenariet med forhøjede temperaturer og mindre sommernedbør holder, vil Hedelyng

have svært ved at regenerere efter endt livscyklus eller efter et lyng-bladbilleangreb og Revling vil vækstmæssigt blive hæmmet. Resultaterne peger på, at stabiliteten af heder vil blive yderligere forringet som følge af klimaændringer.

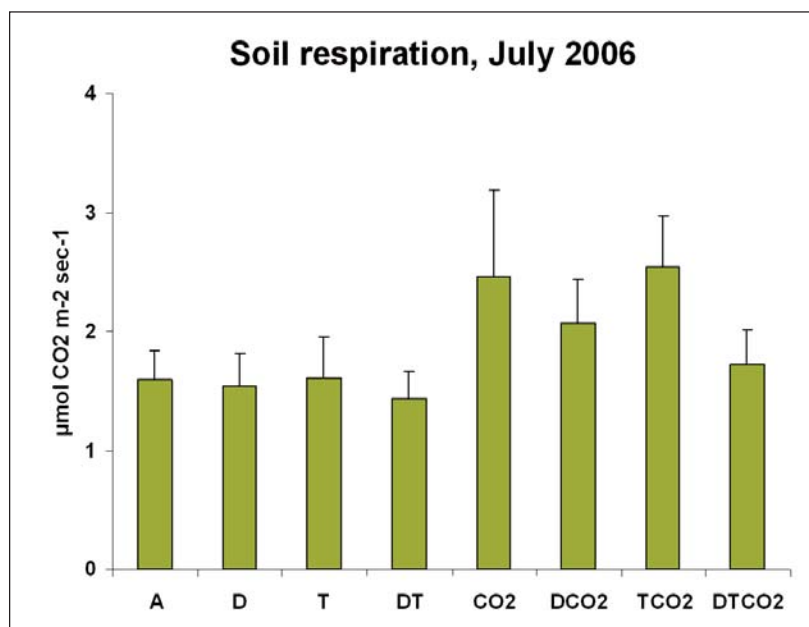
CO₂ og processerne i jorden

Tilføres miljøet ekstra kulstof i forbindelse med øget fotosyntese som reaktion på højere atmosfærisk CO₂, så stiger jordrespirationen. I juli måned viste målinger af jordrespirationen på CLIMAITE-forsøget således den største aktivitet i behandlinger med forhøjet atmosfærisk CO₂ (Fig. 13). Det samlede respiratoriske tab af CO₂ – økosystemrespirationen – som også inkluderer bidraget fra overjordiske plantedele – udgjorde i juli mellem 2,5 og 3,5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$. I modsætning til jordrespirationen var økosystemrespirationen ikke påvirket af forhøjet CO₂ i atmosfæren. Så samlet set øges økosystemets nettooptag af CO₂ ved højere atmosfærisk CO₂, da økosystemet optager mere CO₂, men ikke tilsvarende afgiver mere.

Opvarmning og tørke påvirker jordbundsprocesserne direkte

Jordbundens mikroorganismer, dyr og planterødder udskiller CO₂ ved deres nedbrydning af kulstofholdige forbindelser – under ét kaldet jordrespiration. Når temperaturen øges, stiger omsætningen af kulstof i jorden (Fig. 14). Mineraliseringen af kulstof er overvejende styret af temperaturen, men i meget tørre jorde eller vandmættede jorde er aktiviteten dog meget lav.

Frigivelsen af kvælstof relaterede sig mere til jordens fugtighed end til temperaturen (Fig. 15). I VULCAN-forsøgene fandt vi, at når det var meget tørt som i Spanien, eller jorden var vandmættet som i tørve-jorden i Wales, var N-mineraliseringen ca. 0. Derimod fulgte frigivelsen af N en klokkeformet kurve i mel-



Figur 13. Jordrespiration målt i juli i CLIMAITE-forsøget. Respiration fra jordbunden kan ses som et samlet udtryk for aktiviteten i jorden, dvs. både omsætning af organisk stof og respiration fra rødder og jordbundsdyr.

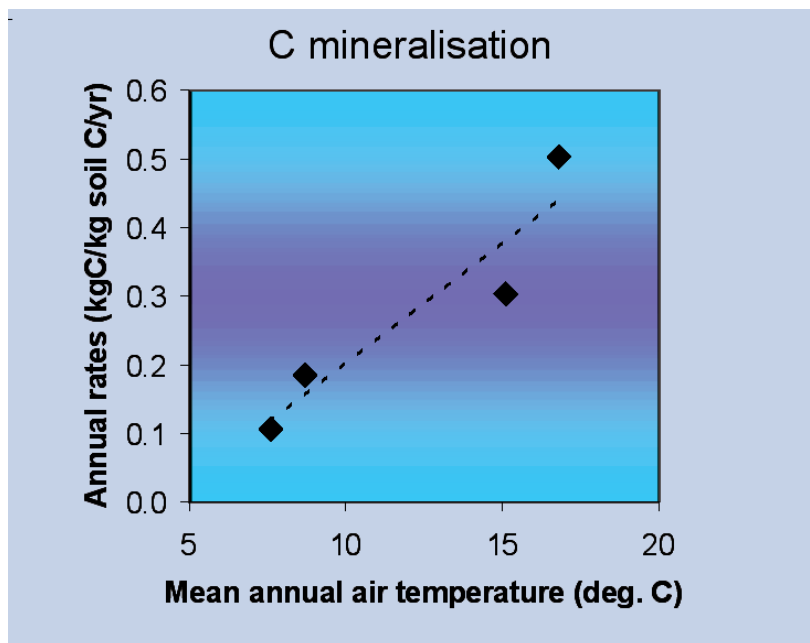
lemområdet. Vi fandt kun en meget lille effekt af opvarmning på N-mineraliseringen. Den manglende temperatureffekt skyldes sandsynligvis, at mikroorganismer og planter udnytter det mineraliserede kvælstof fra omsætning af organisk stof til egen vækst. Frigivelse af kvælstof fra mineraliseringen er netop balancen mellem bruttomineralisering og optag af næring i planter og mikroorganismer. Det betyder, at vi i nogle tilfælde ser lavere indhold af næringsstoffer i jorden efter opvarmning end i kontrolfelter.

I VULCAN-projektets hollandske lokalitet, hvor kvælstofdepositionen er meget høj, var der derimod en meget kraftig effekt af opvarmning på mineraliseringen af kvælstof. Koncentrationen af kvælstof i jordvandet steg næsten til det dobbelte i de opvarmede felter til et niveau omkring WHO-grænse for nitrat i drikkevand. Klimaeffekten på tilgængeligheden af næringsstoffer i jorden er afhængig af økosystemets

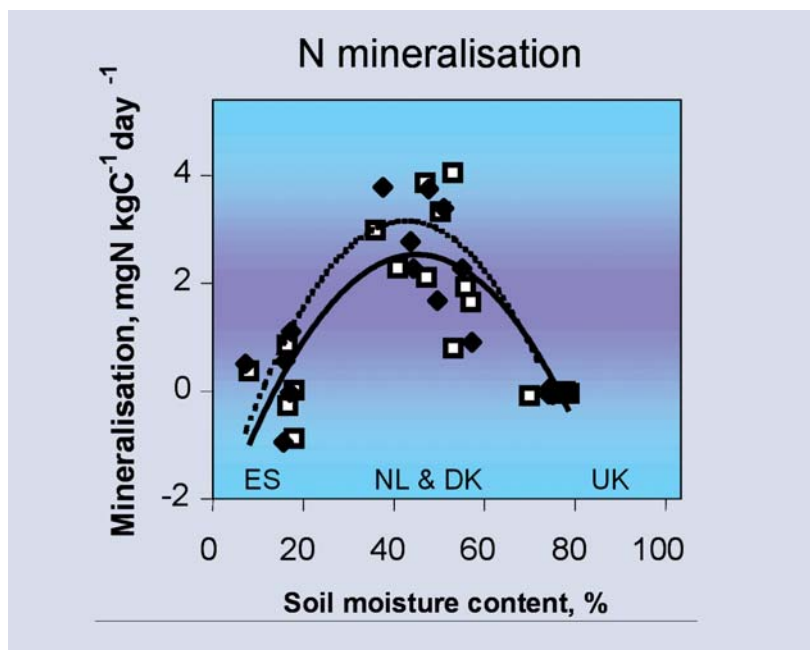
næringsstatus (Schmidt et al. 2004).

Adaptation til ændrede klimaforhold?

Den største diversitet finder vi i jorden, men det er samtidig den gruppe af organismer, vi ved allermindst om. Vi har undersøgt et af de hyppigst forekommende jordbundsdyr, *Cognettia sphagnetorum*. Det er den dominerende enchytræ i jordbunden på Mols og Brandbjerg, hvor den udgør >90 % af enchytræerne i de øverste jordlag. I CLIMAITE-forsøget reducerede tørken populationen med op til 50%. For at undersøge om arten er i stand til at adaptere til mere permanent sommertørke, isolerede og opformerede vi enchytræer i jord fra de forskellige behandlinger i VULCAN-forsøget, hvor dyrene har været udsat for forlænget sommertørke gennem 7 år og dermed gennemført et stort antal generationer. De opformerede dyr blev derefter udsat for tørkestress. Resultaterne viste, at arten ikke er mere til-



Figur 14. C-mineralisering målt som jordrespiration kan overvejende udtrykkes som en funktion af temperatur. Data er fra VULCAN-forsøgene.



Figur 15. Netto N-mineralisering i VULCAN-forsøgene i relation til jordens fugtighed. Frigivelse af kvælstof i jorden er overvejende en funktion af jordens fugtighed og i mindre grad af temperatur. Kontrol (—) og opvarmede (---) felter.

passet tørke, hvis den kommer fra tørkefelter selv efter syv års tørkestress. Det betyder, at arter ikke genetisk har adapteret til de nye klimaforhold (Maraldo m. fl. i review).

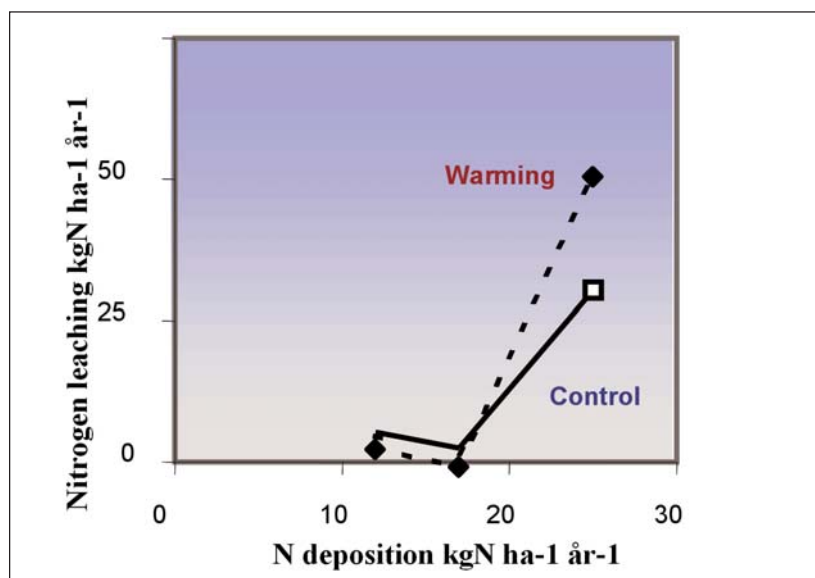
Interaktioner med andre miljøfaktorer

Klimaændringers påvirkning af de enkelte processer og selve økosystemets funktion kan ikke betragtes isoleret. Organismernes tilpasningsevne og økosystemets robusthed vil afhænge af, hvor meget stress de/det i forvejen er udsat for. Arter kan være presset, fordi de er tæt på grænsen for deres udbredelsesområde, hvilket gælder for mange danske arter. Små ændringer i temperatur eller nedbør kan derfor være fatale for en del danske arter, og hvis det drejer sig om nøglearter for økosystemet, vil tab af disse have betydelige konsekvenser, med mindre andre arter med tilsvarende funktion indvandrer. Men hastigheden for indvandring af nye arter er sandsynligvis langsommere end klimaforandringerne, især når det gælder jordbundsorganismer eller specialister blandt planterne, hvilket vil reducere muligheden for kompensation for tabte arter ad den vej. Eksempelvis viste en britisk undersøgelse, at op til 40% af skovbundsfloraens specialister udgøres af myrespredte planter (Hermý 1994), der spredes med en meget lavere hastighed end klimaændringerne. Et andet problem, som hæmmer indvandring af nye arter, er fragmentering og naturlig tilgroning eller tilgroning på grund af eutrofiering. Netop fordi indvandringen af nye arter i mange tilfælde vil ske langsommere end de klimabetingede ændringer i økosystemerne, må vi forvente, at der sker store ændringer i økosystemets sammensætning og funktion i fremtiden. Klimaeffekterne er endnu en stress-faktor på økosystemerne. Virkningen af klima kan forstær-

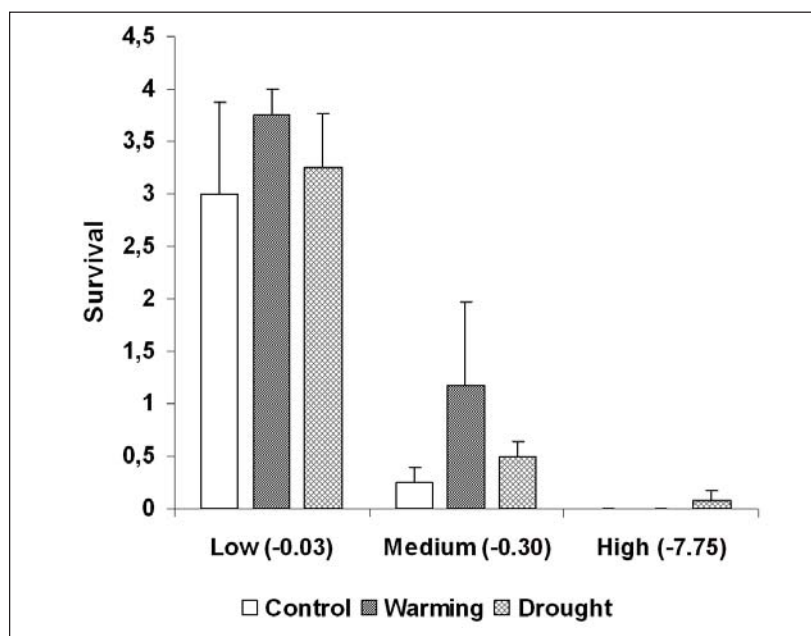
kes af andre påvirkninger og omvendt, som det blev illustreret med den synergistiske effekt mellem N-deposition og opvarmning på kvælstofudvaskningen i Holland, i modsætning til en større tilbageholdelse af kvælstof efter opvarmning i Danmark.

Forudsigelser af klimaeffekter

Klimaændringer medfører samtidige ændringer af CO₂, temperatur og nedbør. Som det kunne ses af ovenstående eksempler vil alle tre faktorer påvirke nøgleprocesser i økosystemet direkte eller indirekte. Desuden vil der være interaktioner mellem faktorerne, som kan forstærke hinanden (f.eks kan opvarmning og øget CO₂ tænkes at forstærke hinanden, fordi øget temperatur fremmer væksthastigheden og øger mineralisering og tilgængelighed af næringsstoffer, samtidig med at øget CO₂ øger vækstpotentialet) eller reducere eller ophæve effekten (f.eks kan planter spare på vandet under tørke, hvis de udsættes for højere CO₂-koncentrationer, da transpirationen nedsættes). Klimaeffekten på økosystemet vil derfor være nettoeffekten af alle de samtidige påvirkninger på dyr, planter og processer i jorden. Det er næsten umuligt at forudsige sådanne nettoeffekter på økosystemerne, når der er mange faktorer involveret. En måde at håndtere dette problem på kan dels være ved at gennemføre forsøg med alle involverede faktorer samtidig, og dels at koble sådanne forsøg med matematiske modeller. Forsøg vil være unikke til at opbygge og forbedre modellerne og deres troværdighed, samtidig med at modellerne derefter vil kunne fungere som uundværlige værktøjer til at generalisere resultaterne og forudsige effekter af klimaforandringer på andre økosystemer, og forudsige ændringer længere frem i tiden end forsøgene kan dække.



Figur 16. Skematisk fremstilling af kvælstofudvaskning ift. atmosfærisk kvælstofnedfald målt som våd deposition baseret på data fra VULCAN-forsøgene. Opvarmning øger mineraliseringen i jorden. Ved lav deposition vil mikroorganismer og planter optage det ekstra kvælstof, men ved høj kvælstofdeposition vil den forøgede mineralisering betyde forøget udvaskning.



Figur 17. Overlevelse af enchytræer udsat for tørkestress i laboratoriet målt som antal individer af *Cognettia sphagnetorum* pr. prøve. Til forsøget er anvendt enchytræer, der er isoleret fra VULCAN-forsøget, hvor de gennem syv år enten har været udsat for natopvarmning eller forlænget sommertørke.

Citeret litteratur

- Beier C., Emmett B., Gundersen P., Tietema A., Penuelas J., Estiarte M., Gordon C., Gorissen A., Llorens L., Roda F. & Williams D. 2004: Novel Approaches to Study Climate Change Effects on Terrestrial Ecosystems in the Field - Drought and Passive Night Time Warming. – *Ecosystems* 7: 583-597.
- Christensen, O.B. 2007. Klimaændringer nu og i fremtiden: Hvad klimamodeller fortæller os. – *Flora og Fauna* 113: 85-89.
- Cornelissen J.H.C., van Bodegom P.M., Aerts R., Callaghan T.V., van Logtestijn R.S.P., Alatalo J., Chapin F.S., Gerdol R., Gudmundsson J., Gwynn-Jones D., Hartley A.E., Hik D.S., Hofgaard A., Jónsdóttir I.S., Karlsson S., Klein J.A., Laundre J., Magnusson B., Michelsen A., Molau U., Quested H.M., Sandvik S.M., Schmidt I.K., Shaver G.R., Solheim B., Soudzilovskaia N., Tolvanen A., Totland Ø., Wada Ø. & Welker J.M. 2007: Climate change and decomposition rates in cold biomes: a global meeting of litters points to negative vegetation feedback. – *Ecol. Letters* 10: 619-627.
- Hermý M. 1994. Effects of former land use on plant species diversity and pattern in European deciduous woodlands. – I: Boyle T.J.B. & Boyle C.E.B. (red.), *Biodiversity, temperate ecosystems, and global change*. Pp. 123-144. Springer, Berlin.
- Maraldo K., Schmidt I.K., Beier C. & Holmstrup M. (submitted). Can the enchytraeid, *Cognettia sphagnetorum*, adapt to increased occurrence of drought? – *Soil Biol. Biochem.*
- Mikkelsen T.N., Beier C., Jonasson S., Holmstrup M., Schmidt I.K., Ambus P., Pilegaard K., Michelsen A., Albert K., Andresen L., Arndal M.F., Bruun N., Christensen S., Danbæk S., Gundersen P., Jørgensen P., Kongstad J., Linden L.G., Maraldo K., Priemé A., Riis-Nielsen T., Ro-Poulsen H., Stevnbak K., Selsted M.B., Sørensen P., Larsen K.S., Carter M.S., Ibrom A., Martinussen, T., Miglietta F. & Sverdrup H. 2007: Experimental design of multifactor climate change experiments with elevated CO₂, warming and drought: the CLIMAITE project. – *Functional Ecology* online publication: www.blackwell-synergy.com
- Schmidt I.K., Williams D., Tietema A., Gundersen P., Beier C. & Emmett B.A. 2004: Soil solution chemistry and element fluxes in three European heathlands and their responses to warming and drought. – *Ecosystems* 7: 638-649.

www.vulcanproject.com
www.climaite.dk